

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

АРТЮХОВ АРТЕМ ЄВГЕНОВИЧ



УДК 66.099.2:936.43.001

**ГІДРОДИНАМІЧНІ ЧИННИКИ ГРАНУЛЯЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ
ЗНИЖЕНОЮ ВИСОТОЮ ПОЛЬОТУ ГРАНУЛ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри процесів та обладнання
хімічних і нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ханик Ярослав Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри хімічної інженерії;

доктор технічних наук, професор
Якуба Олександр Родіонович,
Сумський національний аграрний університет,
професор кафедри технологічного обладнання
харчових виробництв.

Захист дисертації відбудеться “___” березня 2009 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, Україна, м. Суми, вул. Римського - Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розіслано “___” лютого 2009 р.

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради**



Л.Л. Гурець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Актуальною проблемою сьогодення є перехід до високоефективних технологій з мінімальним використанням вичерпних енергоносіїв. Використання сучасних досягнень науки і техніки повинно збільшити кількість нових та модернізованих виробництв, що діють за принципом енергоощадності та раціонального використання природних ресурсів.

На сьогодні проблемам підвищення ефективності технологічних процесів, обладнання та якості продукції приділяється особлива увага. Стосовно галузей виробництва, що пов'язані з отриманням гранульованих продуктів, ці вимоги відображаються у можливості здійснення процесів в універсальних багатофункціональних апаратах великої питомої потужності.

Будівництво нових хімічних підприємств повинне відповідати світовим стандартам, а також враховувати сучасні запити і вимоги замовників до якості продукції, що випускається. Перехід до нової організації процесу грануляції з використанням малогабаритного обладнання, яке дозволить скоротити витрати енергії, природних ресурсів та трудомісткість, зменшити матеріаломісткість і капітальні витрати на будівництво і забезпечить сприятливу екологічну обстановку в навколишньому середовищі, – перспективний напрям розвитку хімічної промисловості в даній галузі.

Враховуючи значний вплив конструктивного оформлення і технологічних параметрів роботи грануляційного обладнання на його габарити, останнім часом ведуться пошуки нових високоефективних способів отримання гранульованої продукції. Практична реалізація перелічених заходів пов'язана з розробленням універсальної апаратури, що відповідає вищезазначеним вимогам.

Питання переходу галузі одержання гранульованих продуктів на принципово новий виток розвитку повинно бути всебічно розглянуте. Сучасне грануляційне обладнання (особливо баштове) застаріло. Воно не відповідає сучасним вимогам щодо економічних показників, витратам на будівництво і обслуговування.

Дослідження, спрямовані на опрацювання високоефективного апаратурного оформлення обладнання для гранулювання, визначення найбільш сприятливої конфігурації та конструктивного оформлення окремих елементів апарата та їх комбінації, комплексне теоретичне й експериментальне вивчення гідродинаміки потоків, повинні вирішувати проблему, яка стоїть перед хімічною промисловістю України на сучасному етапі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконується згідно з пріоритетним напрямом наукової роботи Сумського державного університету "Дослідження вихрових грануляційних та масотеплообмінних пристроїв" (номер державної реєстрації 0106U013012, термін виконання 2006-2008 рр.).

Наукові розробки впроваджені під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темою № 82.05.09.07/п1 „Відпрацювання технологічних і конструктивних параметрів вузла створення пористих гранул та видача вихідних даних для проектування установки одержання пористої аміачної селітри, розробка конструкторської документації на установку одержання пористої

аміачної селітри (ПАС)” (замовник ЗАТ „Експериментально-промислова технологія вибухових робіт” (ЗАТ „ТЕХНОВИБУХ”)).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення науково обґрунтованої методики розрахунку гідродинамічних чинників течій фаз у робочому просторі грануляційного пристрою, що має удосконалену конструкцію для забезпечення зниження висоти грануляційного пристрою, підвищення інтенсивності його функціонування.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

1. Проведено теоретичний аналіз гідродинамічних умов руху та утворення гранул в апаратах різних типів.

2. Розроблено фізичну модель з подальшим математичним моделюванням гідродинаміки руху одно- та багатофазного потоків для подальшого їх теоретичного розрахунку та прогнозування поведінки системи у разі зміни окремих параметрів.

3. Експериментально досліджено умови сталого гідродинамічного режиму роботи апарата зі змінним за висотою перетином робочого простору залежно від комплексу початкових умов, визначено поля швидкостей, а також характер руху гранул за результатами візуального спостереження за ходом процесу.

4. Розроблено інженерну методику конструктивного розрахунку вихрового грануляційного обладнання, видано рекомендації щодо оптимізації роботи апарата.

5. Проведено дослідно-промислове впровадження розробленого апарата у технологічну лінію одержання гранульованих продуктів.

Об'єктом дослідження є течії одно- та двофазного потоків в апаратах з інтенсивною гідродинамікою та зниженою висотою польоту гранул.

Предмет дослідження – гідродинаміка двофазного потоку в апаратах змінного перетину робочого простору із зниженою висотою польоту гранул.

Методи дослідження. Математичне моделювання здійснювалося на базі класичних положень механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки. Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендових зразків грануляційного обладнання на базі використання математичного апарата планування експерименту та математичної статистики. На етапі зіставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень з результатами комп'ютерного моделювання застосовано системи тривимірного твердотільного моделювання КОМПАС-3D (<http://www.ascon.ru/>), програмний комплекс FlowVision (<http://www.flowvision.ru>) та COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Наукова новизна одержаних результатів. На базі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі наукові результати:

– вперше отримано та проведено узагальнення математичних рівнянь, які дозволяють розраховувати гідродинамічні характеристики руху фаз у робочому просторі апарата зі змінною площею перетину та з використанням пристроїв для завихрення;

- за результатами експериментальних досліджень модельних зразків апаратів для гранулювання, комп’ютерних моделей апаратури даного типу та їх зіставлення визначено відмінності в розподілі швидкостей газового потоку в робочому просторі апарата зі змінною площею перетину та наявності обертового руху одно- та двофазного потоків, що досліджено, та вперше отримано гідродинамічні характеристики режимів роботи вихрового гранулятора;

- на основі створеної математичної моделі розроблено методи управління рухом краплі (гранули) у вихровому газовому потоці.

Практичне значення одержаних результатів. На основі теоретичного аналізу створених фізичної і математичної моделей руху однофазного, а потім і двофазного потоків, проведених досліджень гідродинамічних процесів розроблено методики розрахунку малогабаритних вихрових пристроїв зі змінною площею перетину робочого простору. Створено новий тип організації гідродинамічних умов руху потоків у робочому просторі гранулятора, запропоновано та захищено патентами України нові способи гранулювання та нові конструкції апаратів-грануляторів зі змінною площею перетину робочого простору з удосконаленою гідродинамікою. Отримані наукові результати впроваджені у виробництво гранульованих продуктів з особливими властивостями: розроблено нову технологічну лінію отримання гранул з використанням дослідженого обладнання для подальшого впровадження (ЗАТ „Експериментально-промислова технологія вибухових робіт”), видано рекомендації щодо оптимального комплексу гідродинамічних та технологічних параметрів проведення процесу.

Особистий внесок здобувача. У статтях, які написані особисто та у спів-авторстві і опубліковані у фахових виданнях, що затверджені ВАК України, особистий внесок здобувача полягає у такому:

- у роботі [1] проаналізовано стан проблеми гранулювання, основні переваги малогабаритних апаратів змінного перетину з використанням вихрових потоків у порівнянні з іншими типами обладнання;

- у роботі [2] обґрунтовано методи інтенсифікації процесів гранулювання на прикладі конструктивного оформлення окремих вузлів вихрового гранулятора зваженого шару;

- у роботі [3] розроблено математичну базу та створено алгоритм чисельного розрахунку гідродинамічних параметрів робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару;

- у роботі [4] отриманий приблизний аналітичний розв’язок рівняння Нав’є-Стокса з послідуною перевіркою достовірності отриманого результату та визначенням характеру зміни складових повної швидкості у довільній точці робочого простору вихрового гранулятора;

- у роботах [5, 6] розроблено фізичну модель процесів, що властиві грануляторам зваженого шару, та отримано основні результати з визначення полів швидкостей руху фаз у вихрових апаратах;

- у роботі [7] проведено аналіз результатів експерименту та порівняння

їх з результатами комп'ютерного моделювання за розробленими стандартними методиками з метою визначення відмінних рис функціонування вихрових апаратів та використання висновків для розроблення поправок та вдосконалень у методику інженерного розрахунку грануляторів;

- у роботі [8] розглянуто основні етапи розроблення методики інженерного розрахунку вихрових апаратів для проведення гранулювання у зваженому шарі;
- у роботі [9] здійснено авторський нагляд за роботою дослідно-промислових зразків, розроблено високоефективну конструкцію гранулятора для промислового впровадження; отримано результати промислового експерименту.

На базі зазначених робіт захищено патентами України [10, 11] нові способи гранулювання та пристрої.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження» (м. Суми, 2005 р.), XI та XII Міжнародних наукових конференціях «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» (м. Одеса, 2006, 2008 рр.), XXII науковій конференції країн СНД „Дисперсные системы” (м. Одеса, 2006 р.), III Українській науково-технічній конференції з технології неорганічних речовин (м. Дніпропетровськ, 2006 р.), Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Аграрний форум» (м. Суми, 2007 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції «Дни науки» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.), XI науковій конференції «Львівські хімічні читання» (м. Львів, 2007 р.), III Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.), III Міжнародній конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті» (м. Варна, Болгарія, 2007 р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» (м. Львів, 2007 р.), V Всеукраїнській конференції молодих вчених та студентів з актуальних питань хімії (м. Дніпропетровськ, 2007 р.), II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Теорія і практика сучасного природознавства» (м. Херсон, 2007 р.), XX Міжнародній науково-технічній конференції «Реактив-2007» (м. Мінськ, Білорусь, 2007 р.), VIII, IX, X, XI Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених „Технологія” (м. Сєвєродонецьк, 2005, 2006, 2007, 2008 рр.), науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (м. Суми, 2005, 2006, 2007, 2008 рр.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у дев'яти наукових працях у журналах і збірниках, затверджених ВАК України. Отримано патент України на корисну модель та патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 185 найменувань, додатків. Повний обсяг дисертації становить 181 сторінка, серед яких 163 сторінки основного тексту, 5 таблиць, 89 ілюстрацій, з яких 22 розміщено на 5 окремих сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень, зв'язок із науковими програмами, сформульовані мета та задачі досліджень, їх наукова новизна та практичне значення, наведено основні дані щодо апробації роботи, публікацій, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі на основі проведеного патентного пошуку і огляду літературних джерел проаналізовано сучасний стан та шляхи розвитку техніки та технології одержання гранульованих продуктів. Розглянуто класифікацію грануляційних веж та грануляторів зваженого шару за основними функціональними та конструктивними ознаками. Виявлено можливість застосування високоефективного грануляційного обладнання з використанням вихрових потоків.

Закручування газового потоку усередині корпусу апарата дозволяє підвищити стабільність псевдозрідженого шару вихрового гранулятора порівняно із звичайним апаратом псевдозрідженого шару. Це відбувається за рахунок того, що на частки, які перебувають у зваженому стані, діє поле відцентрових сил, що призводить до зменшення впливу чинників, які дестабілізують псевдозрідений шар (локальні перепади тиску, локальна зміна порізності шару, створення повітряних пробок і т.п.).

Узагальнення та зіставлення окремих результатів попередніх авторів у цій області дають можливість зменшити вплив факторів, що дестабілізують процес гранулювання, запропонувавши нову конструкцію малогабаритних грануляційних пристроїв зі стабільними гідро- та термодинамічними показниками.

Використання апаратів вихрового типу надає можливість зменшення висоти падіння гранули та надання їй додаткового обертального руху.

На підставі розглянутих способів підвищення ефективності грануляційних пристроїв та зменшення їх габаритних розмірів виявлено доцільність комплексного поєднання переваг обладнання баштового типу та грануляторів зваженого шару при взаємному виключенні недоліків, які характерні для кожного класу апаратів для гранулювання. У результаті доведено актуальність теми досліджень, визначено мету роботи та поставлено задачу запропонувати нові способи гранулювання, які б поєднували переваги, що властиві кожній із названих груп обладнання, вдосконалити динаміку руху потоків у робочому просторі апарата, отримати розрахункові залежності для визначення основних гідродинамічних характеристик потоків у грануляторі.

У другому розділі наведено загальну методику та основні методи досліджень, що застосовані в дисертаційній роботі.

Математичне моделювання здійснювалося на базі класичних положень механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки. Розв'язання рівнянь математичної моделі здійснено за допомогою системи комп'ютерної математики Maple 9. Створена математична програма розрахунку основних гідродинамічних показників потоків у робочому просторі вихрового гранулятора виконана у середовищі Delphi. Натурні експерименти підпорядковано меті зіставлення їх результатів та результатів теоретичних досліджень. Визначення похибки вимірів та результатів розрахунку основних гідродинамічних характеристик взаємодії-

ючих потоків у робочій зоні експериментального зразка вихрового гранулятора базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях щодо проведення інженерного експерименту та обробки отриманих даних.

У третьому розділі проведено математичне моделювання гідродинаміки однофазного потоку та руху краплі у вісесиметричному закрученому газовому потоці у робочому просторі вихрового гранулятора.

Математичну модель однофазного та двофазного потоків у робочому просторі вихрового гранулятора створено з урахуванням таких припущень та спрощень:

- характер течії газу вісесиметричний $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$;
- рух газу в апараті прийнято усталеним $\frac{\partial V_r}{\partial \tau} = 0$; $\frac{\partial V_\varphi}{\partial \tau} = 0$; $\frac{\partial V_z}{\partial \tau} = 0$;
- дією масових сил у випадку руху елементарного об'єму газового потоку, що розглядається, можна знехтувати $\sum F_r = 0$; $\sum F_\varphi = 0$; $\sum F_z = 0$;
- для конкретного випадку задані закон зміни витратної складової швидкості та тиску вздовж окремих осей координат $V_z = \frac{Q}{S}$;
- частки дисперсної фази мають шароподібну форму.

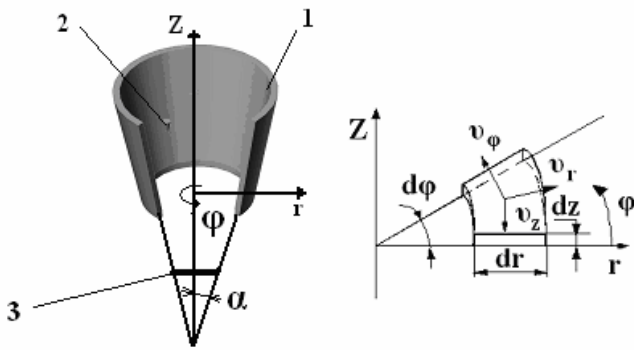


Рис. 1. Схема елементарного об'єму газу в циліндричній системі координат (r, φ, z) : 1 – робочий простір пристрою; 2 – елементарний об'єм газу; 3 – газорозподільувач; dr , $d\varphi$, dz – елементарні прирости за відповідними координатними осями; V_r, V_φ, V_z – радіальна, колова й осьова (витратна) складові швидкості руху газу відповідно; α – половина кута розкриття дифузора.

З урахуванням припущень та спрощень система рівнянь Нав'є-Стокса для випадку руху реального газового потоку в дифузорі та рівняння нерозривності потоку матимуть вигляд

$$\left. \begin{aligned} V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + E \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right) \\ V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} - \frac{V_r V_\varphi}{r} &= E \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right) \\ V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + E \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0, \quad (2)$$

де E – коефіцієнт турбулентної в'язкості відповідно до гіпотези Бусінеска.

Послідовними спрощеннями та перетвореннями отримано залежності зміни складових повної швидкості газового потоку за висотою z та радіусом r в конічних апаратах при $R = f(z) = \operatorname{tg} \alpha \cdot z$

$$V_z(z) = \frac{Q}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2}, \quad (3)$$

$$V_{r1}(z, r) = \frac{-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi}}{r}. \quad (4)$$

Припускаємо, що упродовж радіуса колова швидкість змінюється за квадратичною залежністю, а упродовж осі – за лінійною залежністю. Припущення про характер зміни колової швидкості спирається на результати досліджень вихрових вісесиметричних потоків. Крім того, при $r=0$ та $z=0$ значення $V_\varphi=0$, тобто вільний член загального рівняння другого ступеня дорівнює 0. За цих умов

$$\begin{aligned} V_\varphi(z, r) = & \frac{2Q^2 \cdot r^3}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2 (-2Q \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot z \cdot r^2 - 3Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2 + 2Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 z^3 + 3Q \cdot r^3 + 3E \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 z^3 r) -} \\ & - ((-4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^2 - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r + 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 + \\ & + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r + Q^2 \cdot r \cdot z_1^2 - 2Q^2 \cdot r \cdot z^2) r) / \\ & / (\operatorname{tg} \alpha \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\ & + 3z_1^2 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - 2z^5 \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot Q - \\ & - 3z^4 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot Q + 3z^2 Q \cdot r^3 + 3z^5 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)) + \\ & + ((4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r - \\ & - 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^2 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 - Q^2 \cdot r \cdot z_1^2) r) / (\operatorname{tg} \alpha \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\ & + 3z_1^2 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - \\ & - 2z^3 \operatorname{tg} \alpha \cdot Q \cdot r^2 - \\ & - 3z^4 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot Q + 3z^2 Q \cdot r^3 + 3z^5 \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)). \end{aligned} \quad (5)$$

З урахуванням спрощень та припущень система диференціальних рівнянь руху краплі в циліндричних координатах матиме вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_r}{dr} W_r &= \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} (V_r - W_r); \\ \frac{dW_\varphi}{d\varphi} W_\varphi &= -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} (V_\varphi - W_\varphi); \\ \frac{dW_z}{dz} W_z &= -g + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} (V_z - W_z). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

З введенням позначень $a = \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_y \cdot d_y}$ та $b = \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_y \cdot d_y}$ отримано рівняння для обчислення складових повної швидкості краплі у вісесиметричному закрученому газовому потоці

$$W_\varphi = \frac{a \cdot r \cdot V_\varphi}{a \cdot r + W_r}, \quad (7)$$

$$\frac{dW_r}{dr} W_r = \frac{\left(\frac{a \cdot r \cdot V_\varphi}{a \cdot r + W_r} \right)^2}{r} + a \cdot (V_r - W_r), \quad (8)$$

$$\frac{dW_z}{dz} W_z = -g + b \left[\left(\frac{Q}{\pi \cdot \tan^2 \alpha \cdot z^2} \right) - W_z \right]. \quad (9)$$

З метою зіставлення результатів математичного моделювання та експерименту з відомими моделями та визначення відмінностей між ними проведено моделювання газового потоку за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release та FlowVision 2003 demo за такою математичною моделлю:

нестислива рідина (Incompressible fluid) для розвиненої турбулентної течії

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \nabla(v \otimes v) = -\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_\tau)(\nabla v + (\nabla v)^T)) + S, \quad (10)$$

$$\nabla v = 0, \quad (11)$$

де v – вектор відносної швидкості, м/с; τ – час, с; p – відносний тиск, Па; ρ – густина, кг/м³; μ та μ_τ – динамічна та турбулентна в'язкість, кг/(м·с); T – відносна температура; S – джерело.

$$S = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho} \right) \cdot g + B + \frac{R}{\rho}, \quad (12)$$

де B – сили обертання, м/с², R – сили опору, кг/(м²·с²).

Модель турбулентної нестисливої рідини ґрунтується на к-ε-моделі турбулентності

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + \nabla(vk) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}), \quad (13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \nabla(v\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 f_1(\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right), \quad (14)$$

де ε_{ini} – початкове значення турбулентної дисипації, м²/с³; σ_k , σ_ε , $C_\mu=0$, C_1 , C_2 – значення параметрів к-ε-моделі.

Рівняння нерозривності для несучої фази має такий вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho v) = Q_{mass}, \quad (15)$$

де Q_{mass} – джерело маси за рахунок частинок, кг/(м³·с).

У четвертому розділі подано результати експериментальних досліджень гідродинамічних показників стендових моделей вихрових грануляторів зваженого шару зі змінним набором конструктивних характеристик на експериментальній установці.

Після проведення серії дослідів у межах навантажень за газовою фазою $Q_r=500-1000 \text{ м}^3/\text{год}$, за твердою фазою $G_{\text{тв}}=15-30 \text{ кг/год}$ при $Re>10000$ подано результати експериментальних досліджень полів складових швидкостей руху газового потоку в робочому просторі вихрового гранулятора, результати розрахунків значень складових швидкостей та результати візуального спостереження.

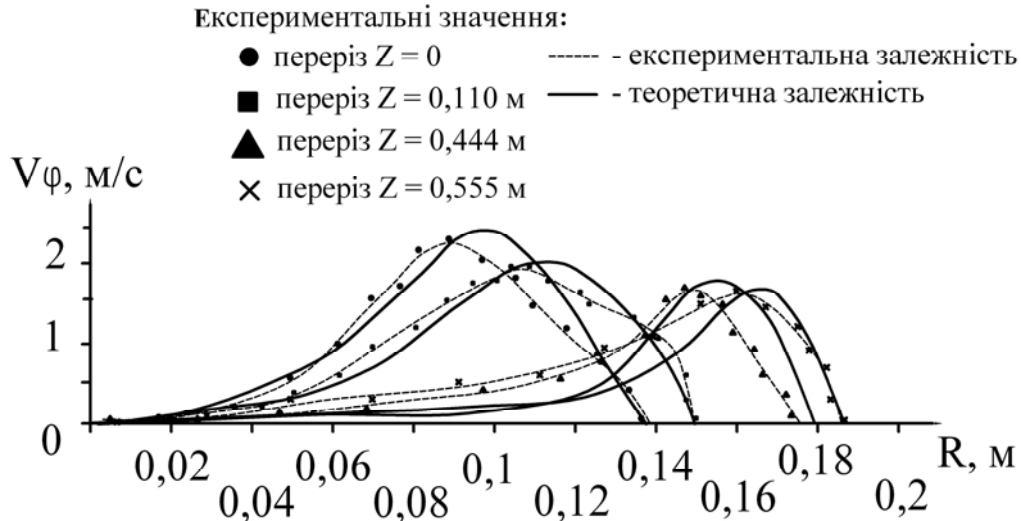


Рис. 2. Характер зміни епюр колової складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару залежно від радіуса його перетину (відлік висоти X ведеться від верхнього перетину газорозподільного пристрою) для газорозподільного пристрою №1

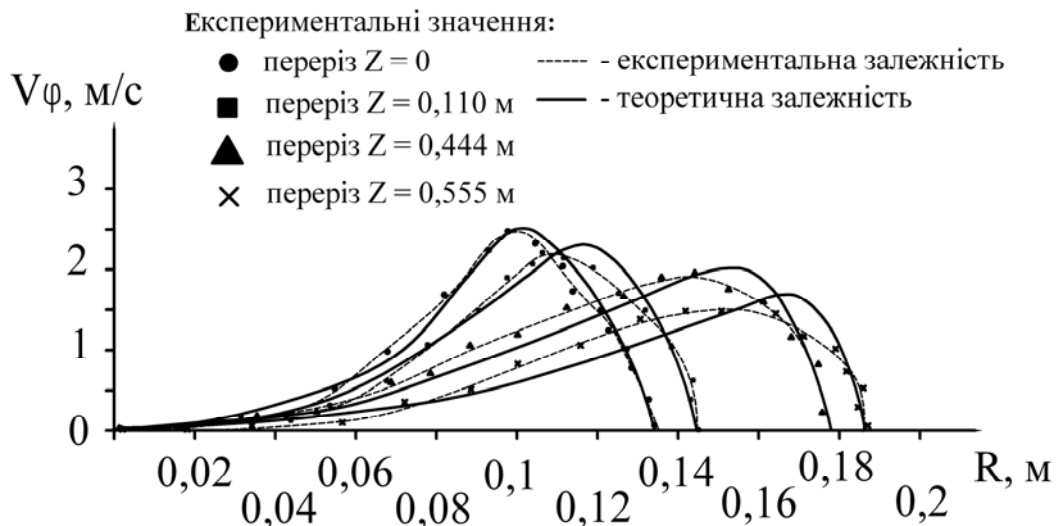


Рис. 3. Характер зміни епюр колової складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару залежно від радіуса його перетину (відлік висоти X ведеться від верхнього перетину газорозподільного пристрою) для газорозподільного пристрою №2

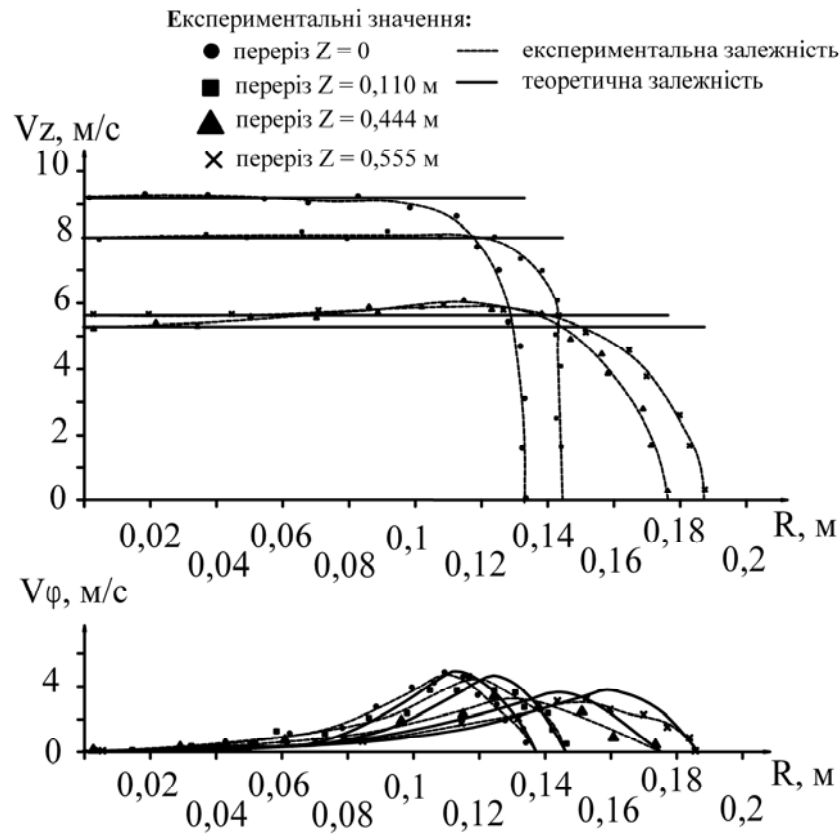


Рис. 4. Характер зміни еюр витратної та колової складових швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару залежно від радіуса його перетину для газорозподільного пристрою №3

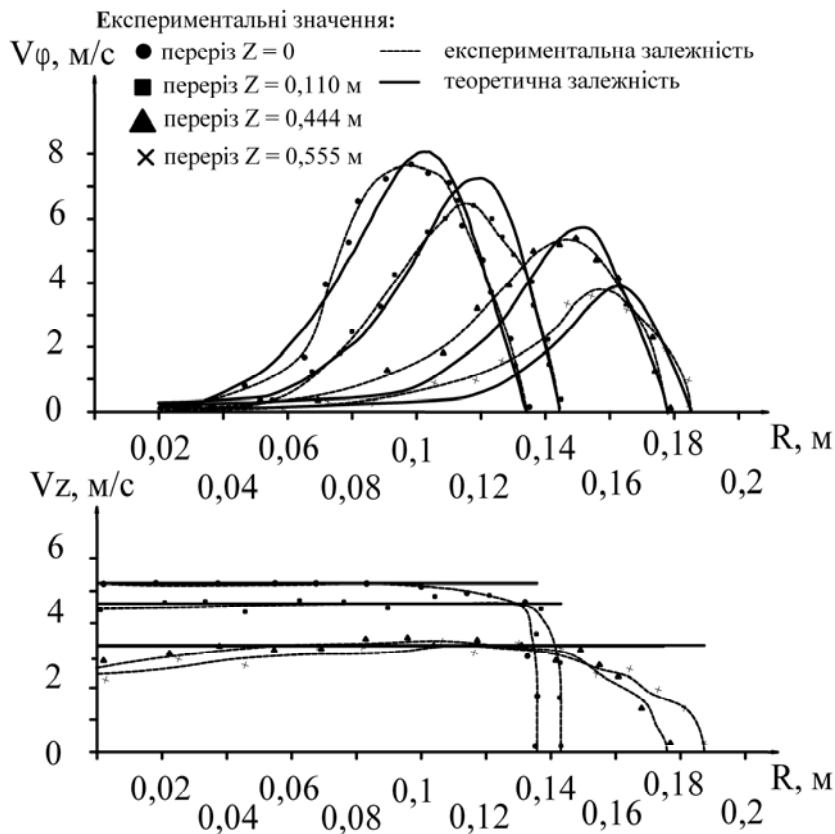


Рис. 5. Основні гідродинамічні характеристики роботи інтенсивного вихрового зваженого шару

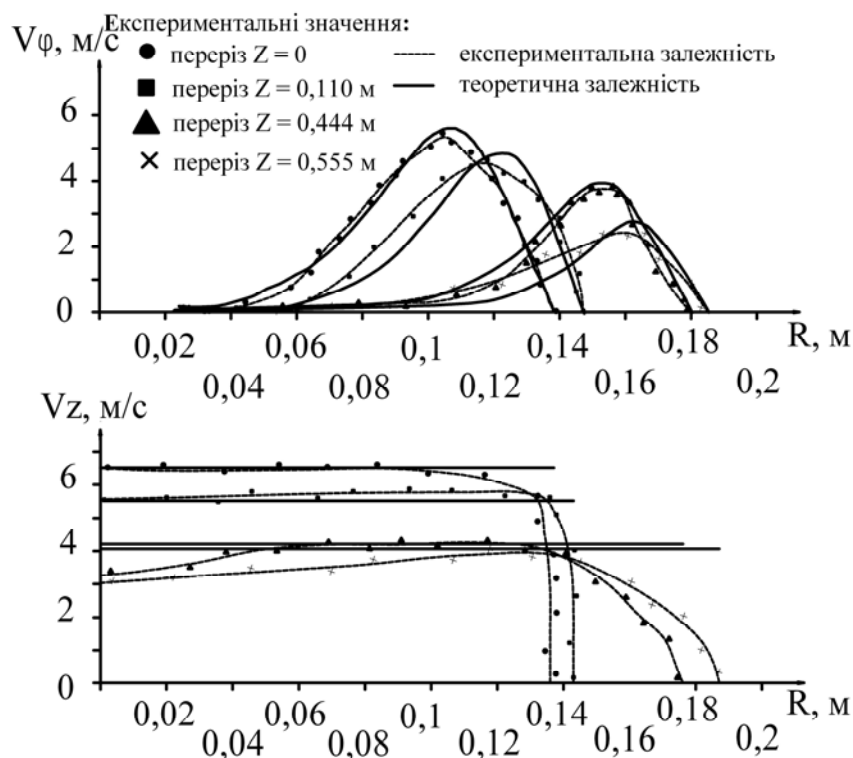


Рис. 6. Основні гідродинамічні характеристики роботи перехідного комбінованого зваженого шару

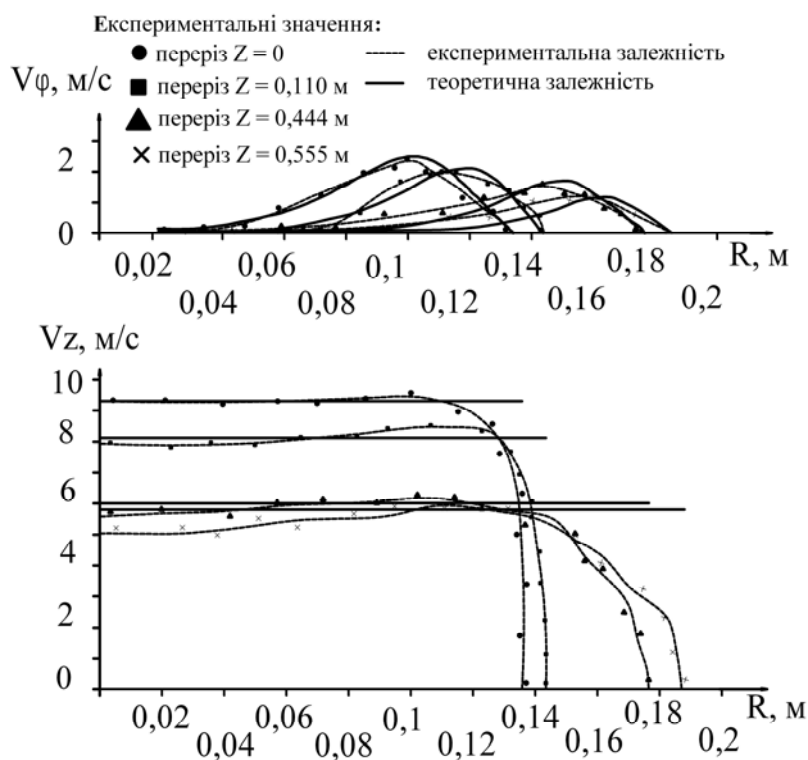


Рис. 7. Основні гідродинамічні характеристики роботи інтенсивного комбінованого зваженого шару

Визначено оптимальну конструкцію завихрювача для створення вісесиметричного потоку теплоносія та зони максимальної інтенсивності вихрового руху гранул у робочому об'ємі апарата на рівні (0,6–0,8) висоти апарата при розвине-

ному турбулентному гідродинамічному режимі руху теплоносія ($Re \geq 10000$) з візуалізацією у вигляді графічних залежностей та фотографій характеру розподілу локальних швидкостей руху гранул. Область існування сталого вихрового зваженого шару для апаратів отримано за умов таких навантажень за фазами: за газовою фазою $Q_g = 600\text{--}1000 \text{ м}^3/\text{год}$; за твердою фазою $G_{\text{ТВ}}$ до $30 \text{ кг}/\text{год}$.

Досліджено та отримано максимально ефективне співвідношення висхідного та тангенційного потоків теплоносія для створення сталого зваженого шару у робочому об'ємі гранулятора (стенд №2) на рівні співвідношення $G_v/G_t = 0,4$ в межах таких навантажень за фазами: за газовою фазою $Q_g = 500\text{--}700 \text{ м}^3/\text{год}$; за твердою фазою $G_{\text{ТВ}}$ до $20 \text{ кг}/\text{год}$.

У п'ятому розділі проведено аналіз отриманих результатів стосовно основних гідродинамічних показників газового потоку та краплі у робочому просторі вихрового гранулятора. Складено алгоритм і програму розрахунку на ЕОМ гідродинамічних характеристик двофазного потоку у вихровому грануляторі. Створено методику інженерного розрахунку вихрових апаратів зваженого шару.

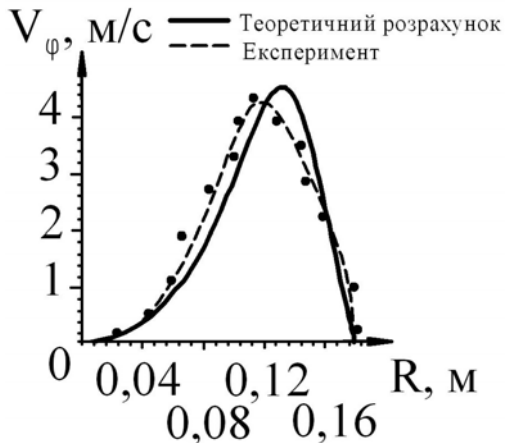


Рис. 8. Зіставлення даних за коловою швидкістю газового потоку, отриманих теоретичними розрахунками та експериментальним шляхом (при $\alpha = 13^\circ$, $z = 0,8 \text{ м}$)

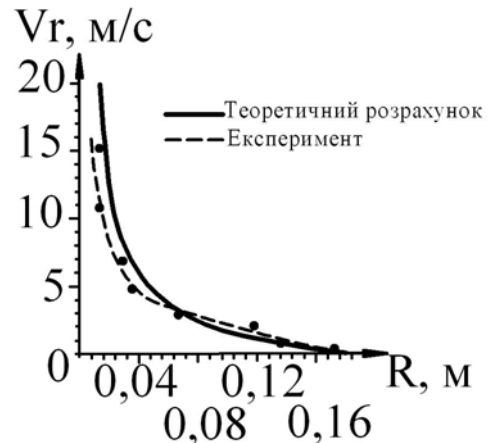


Рис. 9. Зіставлення даних за радіальною швидкістю газового потоку, отриманих теоретичними розрахунками та експериментальним шляхом (при $\alpha = 13^\circ$, $z = 0,8 \text{ м}$)

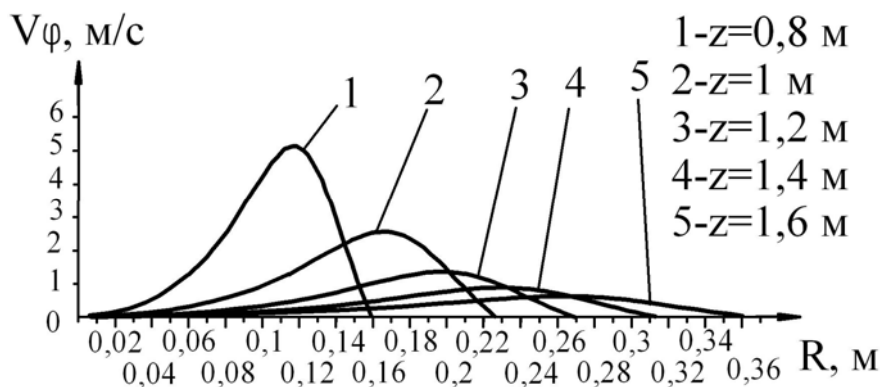


Рис. 10. Розрахунковий характер зміни колової швидкості газового потоку залежно від висоти робочого простору вихрового гранулятора (при $\alpha = 13^\circ$, $Q = 0,63 \text{ м}^3/\text{с}$) на різних висотах (z) поперечного перетину

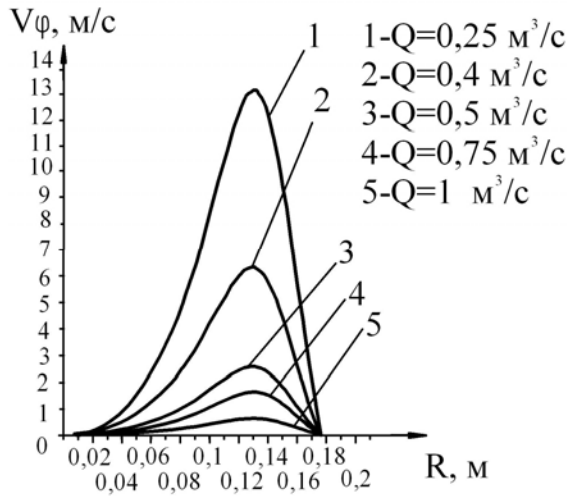


Рис. 11. Розрахунковий характер зміни колової швидкості газового потоку залежно від витрати газового потоку (Q) (при $\alpha=13^\circ$, $z=0,8$ м)

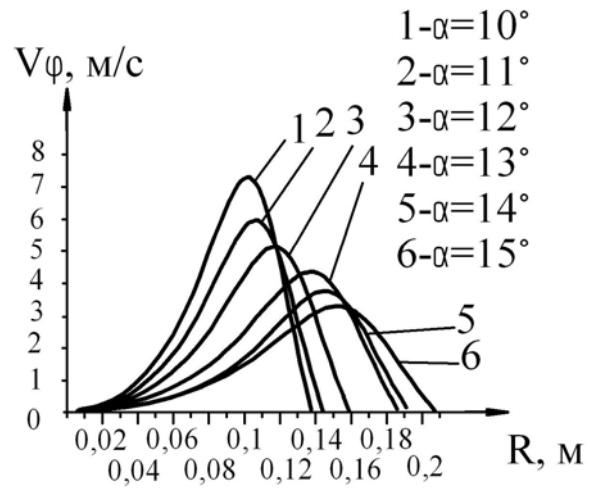


Рис. 12. Розрахунковий характер зміни колової швидкості газового потоку залежно від кута розкриття конуса (φ) (при $Q=0,63$ м³/с, $z=0,8$ м)

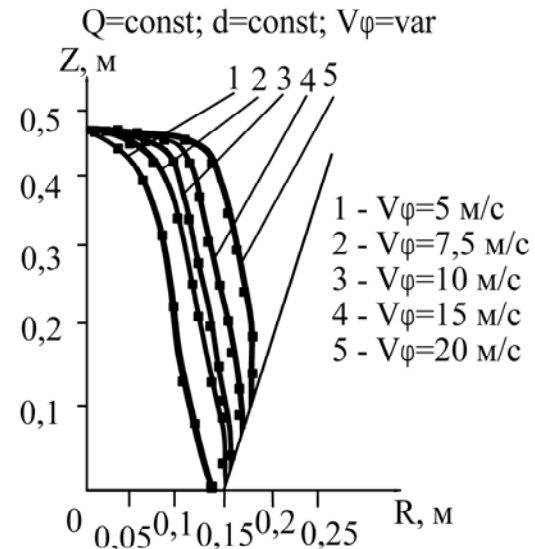
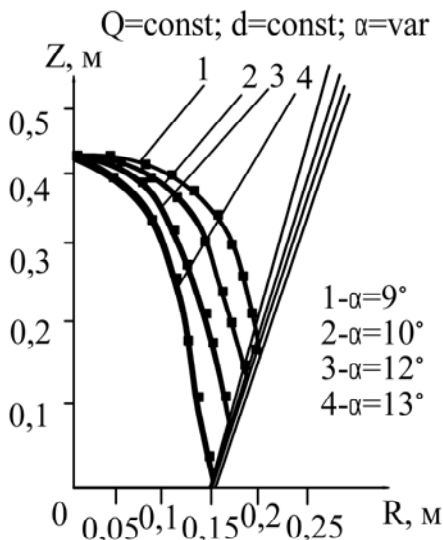
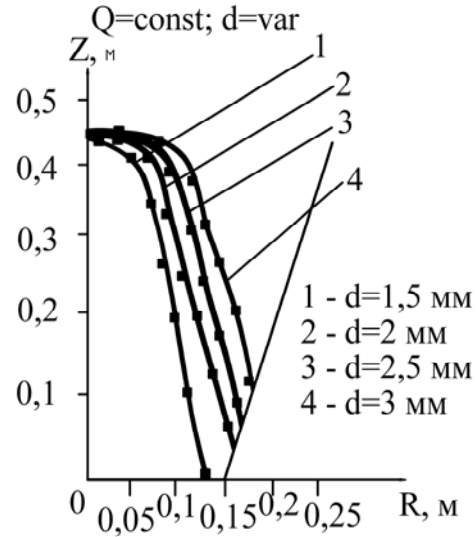
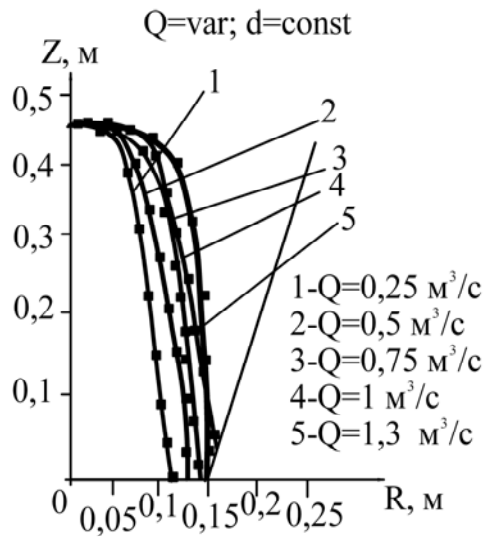


Рис. 13. Розрахункові траєкторії руху гранул за різних геометричних та технологічних умов

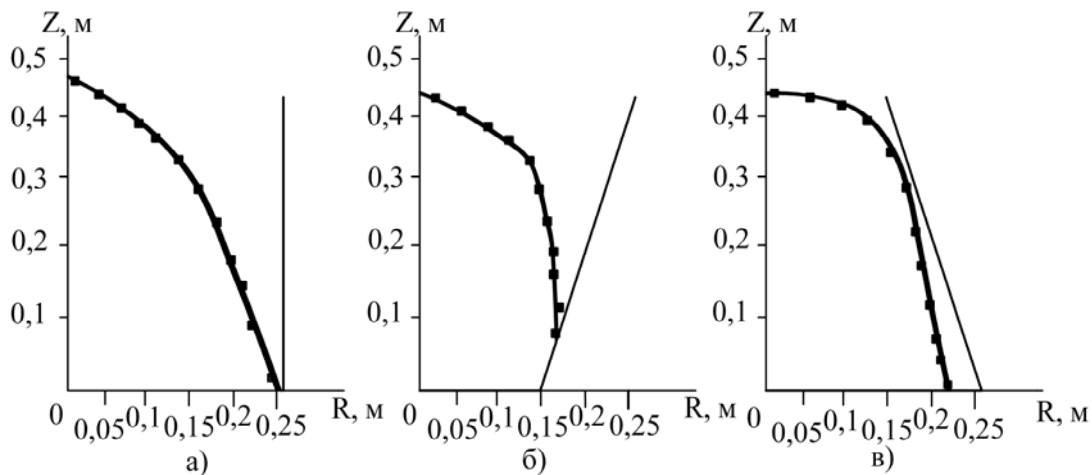


Рис. 14. Порівняльна розрахункова траєкторія руху гранули за різної конфігурації робочого простору апарата: а) циліндричний апарат; б) дифузор; в) конфузор

На підставі аналізу даних визначено місце встановлення пристрою для розпилення або групи пристроїв за радіусом, що забезпечать максимальну ефективність функціонування грануляторів при досягненні піка значення окремих складових повної швидкості газового потоку. Визначено висоту робочого простору гранулятора, де доцільно встановити пристрій для розпилення на підставі отриманих результатів експерименту та порівняльного аналізу їх з результатами теоретичних залежностей. Проаналізовано вплив початкових, геометричних та технологічних умов (кут розкриття конуса, витрата газового потоку, початкове закручення потоку, конфігурація робочого простору) на траєкторію руху та час перебування гранул у робочому просторі вихрового гранулятора.

Винайдено умови реалізації нових способів гранулювання з використанням нових конструкцій малогабаритних грануляційних пристроїв, які захищено патентами України, запропоновано та створено схему (рис. 15) отримання гранульованого продукту з використанням вихрового гранулятора.

Для підтвердження відповідності отриманих наукових результатів при застосуванні їх у роботі промислового апарата наведено показники дослідження міцності гранул та їх гранулометричного складу від режиму роботи апарата (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Залежність міцності гранул, гранулометричного складу та конфігурації зваженого шару від гідродинамічного режиму обробки гранул

Номер дослід-ду	Швидкість обертання зваженого шару, м/с	Міцність гранули гр./гран.	Критерій Re	Примітка
1	16,99	406	2746	Вихровий закручений шар (гранулометричний склад – норма)
2	8,7	364	1406	Комбінований завислий шар (гранулометричний склад – норма)
3	7,6	186	1228	Комбінований завислий шар (значна кількість розколотих гранул)

Таблица 2

Тип обладнання	Продукція	Поглинаюча здатність δ , %	Міцність F, гр./гран.
Тарілчастий гранулятор	Аміачна селітра	4,5	320
Грануляційна вежа	Аміачна селітра	7,6	200
Вихровий гра- нулятор	Аміачна селітра	10	450

У додатках наведені блок-схема та текст програми розрахунку гідродинамічних показників двофазного потоку і конструктивних розмірів малогабаритних вихрових апаратів, акт промислового впровадження наукових результатів та технологічних рекомендацій, отриманих у дисертаційній роботі.

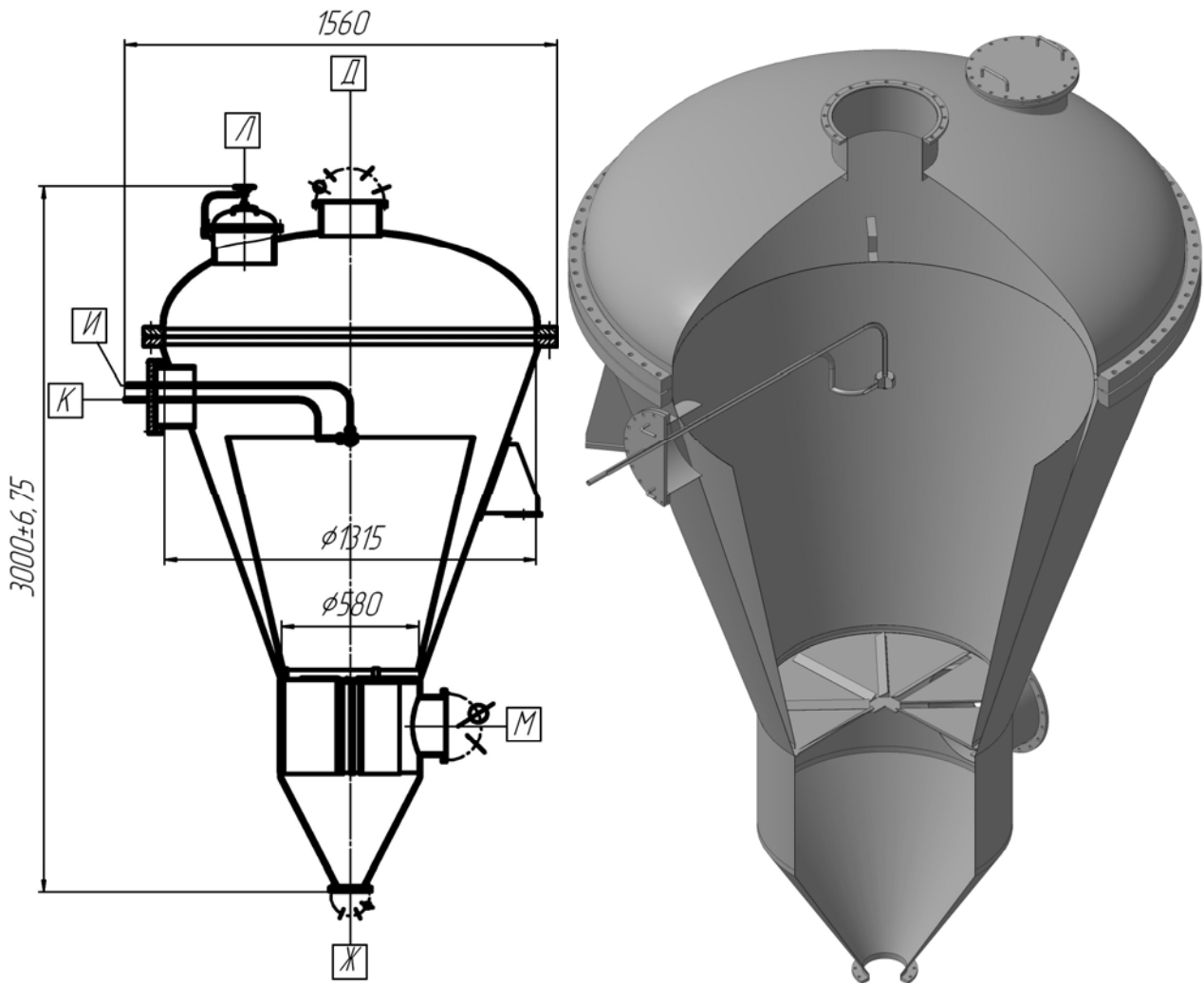


Рис. 16. Промисловий зразок вихрового гранулятора зваженого шару

ВИСНОВКИ

1. На підставі літературного огляду та аналізу гідродинамічних параметрів роботи грануляційних пристроїв різних типів виявлено недоліки існуючих конструкцій, визначено напрямки удосконалення та обґрунтовано можливість зменшення габаритних розмірів та висоти польоту гранули у вихрових апаратах. Доведено, що запропонована конструкція забезпечує високу ефективність процесу.

2. Розроблено математичну модель розрахунку гідродинамічних параметрів однофазного та двофазного вихрових потоків з можливістю отримання полів швидкостей потоків у довільній точці робочого простору вихрового гранулятора.

3. Експериментальним шляхом досліджено вплив конструктивних та технологічних параметрів на створення стабільного зваженого шару різноманітних конфігурацій з візуалізацією даних у вигляді фото та графічних залежностей основних гідродинамічних параметрів роботи гранулятора.

4. Проведено порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень, одержано гідродинамічні характеристики модельного та промислового зразків вихрового гранулятора.

5. На підставі комп'ютерного моделювання визначено особливості роботи вихрових апаратів та відмінності від класичних апаратів зваженого шару.

6. Розроблено методику розрахунку гідродинамічних показників вихрових грануляторів зваженого шару з визначенням основних гідродинамічних характеристик та методику інженерного розрахунку вихрового гранулятора.

7. Запропоновано нові способи гранулювання та нові конструкції грануляторів, які захищені патентами України. На базі аналізу результатів дисертаційної роботи проведено впровадження дослідженого апарата в технологічну лінію отримання гранульованих продуктів безбаштовим методом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Склабинский В.И., Артюхов А.Е. Вопросы энергосбережения при внедрении в производство малогабаритного грануляционного оборудования / В.И. Склабинский, А.Е. Артюхов // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – №5 (89). – С. 76–79.

2. Артюхов А.Є. Новітнє грануляційне обладнання. Вихровий гранулятор з вібраційним розпилом розплаву / А.Є. Артюхов // Наукові праці ОНАХТ. – 2006. – Випуск 28. – Т.2. – С. 24–27.

3. Артюхов А.Е., Склабинский В.И. Математическое моделирование процесса движения гранул в вихревых аппаратах с малой высотой рабочей камеры / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – №12 (96). – С. 5–11.

4. Склабінський В.І., Артюхов А.Є. Розрахунок гідродинамічних параметрів закручених потоків у вихрових грануляторах аналітичним методом / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – №3. – С. 62–70.

5. Артюхов А.Є., Маренок В.М., Склабінський В.І. Дослідження умов формування вихрового псевдозрідженого шару в малогабаритних масообмінних апаратах / А.Є. Артюхов, В.М. Маренок, В.І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – №3. – С. 10–17.

6. Склабінський В.І., Артюхов А.Є. Малогабаритні апарати змінного перетину з вихровим псевдозрідженням шаром. Вплив розподільних пристроїв на рух гранул / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. – 2006. – №2(73). – С. 55–59.

7. Артюхов А.Є., Маренок В.М., Склабінський В.І. Комплексне дослідження вихрового псевдозрідженого шару та умов його застосування в технології виробництва мінеральних добрив / А.Є. Артюхов, В.М. Маренок, В.І. Склабінський // Вісник Сумського національного аграрного університету. – 2008. – №3(19). – С. 182–185.

8. Артюхов А.Є., Склабінський В.І. Розробка методики інженерного розрахунку вихрових грануляторів / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Вопросы химии и химической технологии. – 2007 – №5. – С. 209–211.

9. Артюхов А.Є., Склабінський В.І. Промислове впровадження апаратів вихрового типу для отримання гранульованих продуктів / А.Є. Артюхов,

В.І. Склабінський // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – Випуск 32. – С. 16–21.

10. Патент №29950 Україна МПК (2006) B01J2/16. Пристрій для гранулювання рідкого матеріалу / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський, А.С. Стеценко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №u200512066; Заявлено 15.12.2005; Надрук. 11.02.2008, Бюл. №3, 2008р.

11. Патент №82754 Україна МПК (2006) B01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський; заявник та патентовласник Сумський державний університет – №a200608137; Заявлено 20.07.2006; Надрук. 12.05.2008, Бюл. №9, 2008р.

АНОТАЦІЯ

Артюхов А.Є Гідродинамічні чинники грануляційних пристроїв із зниженою висотою польоту гранул. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології. — Сумський державний університет, Суми, 2009.

Дисертація присвячена питанням теоретичних та експериментальних досліджень гідродинамічних показників однофазного та двофазного потоків у робочому просторі малогабаритних апаратів вихрового типу з інтенсивною гідродинамікою та змінною площею перетину робочого простору.

У даний час вітчизняні підприємства, що спеціалізуються на виробництві гранульованих пористих продуктів з розчинів і розплавів, використовують для цього грануляційні вежі. Цей тип обладнання характеризується значними капітальними затратами на виготовлення, технічне обслуговування і ремонт. Будівництво принципово нових малотоннажних підприємств, заснованих на виробництві гранульованих продуктів за допомогою грануляторів псевдозрідженого шару, - один із способів зниження витрат на виробництво гранульованих пористих продуктів і збільшення їх якісних характеристик.

На базі створеної фізичної та математичної моделей розроблено методику розрахунку гідродинаміки робочого простору вихрових апаратів, визначено гідродинамічні характеристики потоків та оцінено вплив початкових, технологічних та геометричних умов на габарити грануляційних пристроїв. Створено алгоритм та методику інженерного розрахунку апаратів вихрового типу. Запропоновано та захищено патентами України новий спосіб отримання гранульованого продукту та нові малогабаритні високоефективні пристрої для здійснення гранулювання. Проведено дослідно-промислове впровадження апаратів вихрового типу з порівняльним аналізом товарної продукції, результати якого довели високу ефективність розробленого обладнання.

Ключові слова: гранулювання, гідродинаміка потоків, вихровий гранулятор, моделювання, габарити.

АННОТАЦИЯ

Артюхов А.Е. Гидродинамические факторы грануляционных устройств со сниженной высотой полёта гранул. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 — процессы и оборудование химической технологии. — Сумский государственный университет, Сумы, 2009.

Диссертация посвящена вопросам теоретических и экспериментальных исследований гидродинамических показателей однофазного и двухфазного потоков в рабочем пространстве малогабаритных аппаратов вихревого типа с интенсивной гидродинамикой и переменной площадью сечения рабочего пространства для обеспечения возможности уменьшения габаритных размеров аппаратов для гранулирования и увеличения времени пребывания капли в рабочей полости аппарата. Это обеспечит переход к новой организации процесса гранулирования с использованием малогабаритного оборудования с сокращением расходов энергии, природных ресурсов и трудоемкости, уменьшением материалоёмкости и капитальных затрат на строительство новых технологических линий и восстановление существующих.

Вопрос перехода отрасли получения гранулированных продуктов на принципиально новый виток развития должно быть всесторонне рассмотрено. Современное грануляционное оборудование (особенно башенное) устарело. Оно не отвечает современным требованиям относительно экономических показателей, расходам на строительство и обслуживание. Исследования, направленные на проработку высокоэффективного аппаратного оформления оборудования для грануляции, определения наиболее благоприятной конфигурации и конструктивного оформления отдельных элементов аппарата и их комбинации, комплексное теоретическое и экспериментальное изучение гидродинамики потоков должны решать проблему, которая стоит перед химической промышленностью Украины на современном этапе.

Разработана физическая модель движения капли в рабочем пространстве вихревого гранулятора, которая учитывает начальные, технологические и геометрические параметры рассматриваемого процесса и позволяет оценить влияние этих факторов на движение капли. Математическая модель вихревого газового потока и модель движения гранулы в вихревом газовом потоке позволяет рассчитывать основные гидродинамические характеристики каждой из фаз в каждой точке рабочего пространства вихревого аппарата.

Экспериментально установлены характер движения гранул и основные гидродинамические характеристики работы устройств для создания вихревого потока теплоносителя в зависимости от конфигурации элемента для завихрения; зоны уменьшения интенсивности движения гранул в рабочем объеме вихревого гранулятора; максимально эффективное соотношение восходящего и тангенциального потоков теплоносителя для создания стабильного псевдооживленного слоя в рабочем объеме гранулятора.

На базе созданной физической и математической моделей разработана методика расчета гидродинамики рабочего пространства вихревых аппаратов,

определены гидродинамические характеристики потоков и оценено влияние начальных, технологических и геометрических условий на габариты грануляционных устройств. Составлены алгоритм и программа расчета на ЭВМ для определения гидродинамических показателей работы вихревых аппаратов и оценки траектории и времени пребывания капли в аппарате. Разработана методика инженерного расчёта вихревых аппаратов.

Предложен и защищен патентами Украины новый способ получения гранулированного продукта и новые малогабаритные высокоэффективные устройства для осуществления процесса гранулирования.

Проведено опытно-промышленное внедрение аппаратов вихревого типа со сравнительным анализом товарной продукции, результаты которого показали высокую эффективность разработанного оборудования.

Ключевые слова: гранулирование, гидродинамика потоков, вихревой гранулятор, моделирование, габариты.

SUMMARY

Artyukhov A.E. Hydrodynamic factors of granulation devices with a decreased hight of granules flight. — The manuscript.

The dissertation on getting a scientific degree of candidate of technical science, on a speciality 05.17.08 — processes and the equipment of chemical technology. — Sumy State University, Sumy, 2009.

The dissertation deals with the theoretical and experimental research of hydrodynamic indicators of one or two phase flows in the operating space of small-sized vortical devices with the variable area of an operating space intersection.

At present Ukrainian enterprises are specialized in the manufacturing of different granular products from solutions and fusions using granulation towers. This equipment requires great money input for its making, technical maintenance and repair. It is rather complex to be produced and maintained because of its dimensions. Setting up of new enterprises based on the manufacturing of granular products by means of false boiling vortex layer granulators is one of the ways expenses of decline for producing granular porous products and increasing their quality. To achieve this goal we must introduce the newest developments of modern science and technology.

The methods of computation of operating space hydrodynamics in vortical devices were worked out based on physical and mathematic models. Hydrodynamic characteristics of flows were defined and the effects of starting, technological and geometrical conditions on the sizes of granulation devices were estimated. An algorithm and method of engineering calculation of vortical type vehicles is created. The new method of granular production and new small-sized high efficient devices for granulation were put forward and patented in Ukraine. Experimental and industrial installation of vortical devices was made alongside with analysis of marketable products. The results proved the high efficiency of the devices made.

Keywords: granulation, hydrodynamics of flows, vortical granulator, modeling, sizes.

Підп. до друку 14.01.2009.
Обл.-вид. арк. 0,9.
Ум. друк. арк. 1,1.
Наклад 100 пр.
Замовлення №

Формат 60х90/16.
Папір ксероксний.
Гарнітура Times New Roman Cyr.
Друк офсетний.

Видавництво СумДУ. 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.
Свідоцтво ДК № 3062 від 17.12.2007 р.
Друкарня СумДУ. 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.